

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Абызова Алексея Александровича на тему: «Обеспечение безотказности элементов ходовых систем быстроходных гусеничных машин при проектировании на основе моделирования процессов эксплуатации и формирования отказов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» и 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Анализ работы.

Как следует из названия работы, представленной на рассмотрение, диссертация Абызова А. А. посвящена проблеме обеспечения при проектировании безотказности элементов ходовых систем быстроходных гусеничных машин на основе моделирования процессов их реальной эксплуатации.

Общеизвестно, что для гусеничных машин, используемых в качестве дорожно-строительных, транспортных и тяговых машин, эксплуатация которых происходит преимущественно в условиях необустроенной местности, вопросы, связанные с обеспечением безотказной работы ходовой части, являются одними из основных.

Особенно это важно для быстроходных гусеничных машин, в процессе эксплуатации которых, как и отмечает автор (стр. 6), на ходовую часть приходится до 40 % отказов.

Это связано с одной стороны, с необходимостью в условиях компоновочных и массово-габаритных ограничений при проектировании ходовой части создавать высоконагруженные конструкции ее узлов и элементов, а с другой стороны – несовершенностью оценки их усталостной прочности и безотказности на стадии разработки, а также недостаточным учетом параметров внешних воздействий, характерных для условий реальной эксплуатации при стендовых испытаниях и отработке узлов.

Исходя из этого, целью своей работы автор ставит создание и внедрение в практику конструкторских бюро отрасли нового подхода, позволяющего на ранних стадиях проектирования и опережающей отработке конструкций решать комплекс взаимосвязанных задач по основному выбору проектных решений, обеспечивающих требуемые характеристики безотказности элементов ходовой системы с учетом конструкторских и технологических факторов, что является безусловно актуальным и позволяет существенно продвинуть решение проблемы надежности ходовой части гусеничных машин.

Диссертация состоит из введения, десяти глав, заключения и выводов, списка используемой литературы (239 наименований). Изложена на 263 листах машинописного текста, содержит 104 рисунка и 13 таблиц.

Во введении автор формулирует проблему исследования и на примере ходовой части быстроходной гусеничной машины массой 14 т отмечает, что для гусениц с РМШ является характерным после незначительной зоны проработки прогрессирующее увеличение интенсивности отказов, обусловленное усталостными и износными повреждениями (рисунок 1).

Приведенные данные подтверждают актуальность работы и указывают на недостатки расчетных и лабораторных исследований на ранних стадиях разработки.

Во введении также изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы, реализация и внедрение ее результатов.

В первой главе диссертации автором рассмотрено состояние вопроса, выполнен обзор существующих подходов и расчетных методов, изложены цели и задачи исследования.

Отмечается, что разработанный автором новый подход базируется на общей теории имитационного моделирования.

Автор также анализирует существующие подходы к описанию условий эксплуатации гусеничных машин, методы моделирования систем шасси, тео-

рии поворота, моделирование взаимодействия опорной поверхности гусеницы с грунтом, модели накопления усталостных, износных и термомеханических повреждений.

На основании анализа приведенных в главе данных автор расширенным образом излагает цель и задачи исследования, а также требования, предъявляемые к математической модели эксплуатации шасси и описанию внешних условий.

Так, при разработке математической модели автором ставятся задачи:

- модель должна описывать связанную динамическую систему гусеничной машины, включающую ходовую часть, корпус и силовую установку;
- модель должна иметь технико-эргономическую подсистему, предназначенную для формирования управляющих воздействий водителя с целью изменения скоростями движения по местности в соответствии с дорожными условиями и ограничивающими факторами;
- модель должна учитывать нелинейности характеристик систем шасси гусеничной машины: ходовой части и ее элементов, а также двигателя и трансмиссии при смене передач и движения в повороте.

Также ставится задача разработки модели взаимодействия гусеницы с грунтом на основе конечноэлементного моделирования.

Проведение с помощью разработанных моделей расчетных исследований в широком диапазоне изменения внешних воздействий предполагает установление закономерностей изменения вероятностных характеристик эксплуатационной нагруженности и моделирование процессов формирования усталостных и износных отказов.

Вторая глава диссертации посвящена вопросам моделирования процессов реальной эксплуатации гусеничной машины.

В ней автором представлена разработанная блок-схема комплексного моделирования процесса эксплуатации (рисунок 2.1), где в качестве исходной информации в модель машины задается комплекс характеристик внешней среды.

Отмечается, что поскольку для быстроходной гусеничной машины одним из основных факторов, ограничивающих скорость движения машины является плавность хода, особую важность приобретает метод описания микропрофиля трассы.

С целью обобщения задаваемых внешних воздействий и получения безотносительных к конкретным условиям испытательного полигона оценок надежности и ресурса, автором для описания микропрофиля трасс выбран метод скользящего суммирования, с помощью которого для дальнейших расчетных исследований смоделированы четыре типа трасс с различной интенсивностью дорожного микропрофиля (таблица 2.1).

Третья глава диссертации посвящена разработке математической модели для описания эксплуатационной нагруженности гусеничных машин.

При анализе требований, предъявляемых к математической модели шасси гусеничной машины, отмечается, что она (модель) должна удовлетворять двум противоречивым требованиям: адекватно отображать динамические процессы при движении машины и быть достаточно простой, обеспечивающей получение результатов с приемлемыми затратами времени.

При этом результатами проведенных экспериментальных исследований обосновывается, что математическая модель, ориентированная на решение задач нагруженности ходовой части, должна описывать не только прямолинейное, но и криволинейное движение машины, а также включать подсистему, моделирующую переходные процессы в силовой установке с учетом характеристик двигателя, работы фрикционных элементов, гидравлических и гидрообъемных передач.

В разработанной модели в расчетной схеме корпуса и системы поддрессоривания (рисунок 3.1) учтены масса опорного катка, нелинейность усилия в подвеске от относительного перемещения и скорости опорного катка, отрывы опорных катков и пробой подвесок, усилия со стороны гусениц на крайние катки.

В качестве допущения принято, что гусеница, как гибкая лента, облегает поверхность микропрофиля, а контакт между катком и гусеницей рассматривается как точечный (страница 69).

Предложенный в разделе 3.2.1 способ моделирования гусеницы позволяет учесть удлинения ветвей гусеницы, вызванные ее провисанием, а в случае с РМШ – удлинение, вызванное деформацией шарниров.

Полученные на основании расчетных формул (страница 75) зависимости (рисунки 3.4 и 3.5) показывают, что неучет удлинения свободной ветви, вызванного провисанием гусеницы, приводит к принципиально неверным результатам при усилиях в гусеничном обводе, близких к нулю.

Результаты расчета для случая движения машины по трассе показали, что при учете провисания гусеницы СКО значений усилий в ветвях гусеницы могут иметь отличия до 20 ... 100 % по сравнению с расчетом без учета провисания.

Таким образом, наиболее точные результаты позволяют получить использование модели, учитывающей и податливость РМШ, и провисание гусеницы.

При моделировании процесса взаимодействия гусеницы с грунтом (раздел 3.2.2) в модели учитываются деформации гусеницы, вызванные предварительным натяжением, перемещением катков относительно корпуса машины, центробежными силами, поворотом ведущего колеса и проскальзыванием гусеницы относительно грунта (зависимости 3.1).

Моделирование силовой установки (раздел 3.3) в диссертации рассматривается на примере машины с дизельным двигателем, гидротрансформатором и механизмом поворота в виде бортовых коробок передач (рисунок 3.8а).

Для моделирования работы двигателя в динамических режимах, что соответствует условиям реальной эксплуатации, автором выполнены экспериментальные и расчетные исследования, которые обоснованно позволили предложить в качестве параметра идентификации процесса разгона исполь-

зовать величину перебега угловой скорости вала двигателя ($\Delta\omega$), как наиболее чувствительную к постоянной времени регулятора (τ_{∂}).

Полученные дифференциальные уравнения, описывающие движение центра тяжести корпуса и остальных элементов, приведены на страницах 93, 94.

Четвертая глава посвящена моделированию процесса взаимодействия опорной поверхности трака с грунтом при криволинейном движении машины.

Моделирование грунта выполнено в пакете программ LS-DYWA. На примере БМП-2 проведены расчетные исследования динамики гусеничных машин при движении по грунтам характерных трех типов: супесь, суглинок и глина. Это позволило получить зависимость сдвигающей силы от смещения трака (рисунки 4.10...4.11) и зависимости нагрузки на первый трак от нагрузки на каток (рисунок 4.15), которые были использованы при дальнейшем моделировании движения машины для расчета нагрузок, действующих на траки, находящиеся в активных участках опорной ветви гусеницы.

В главе 5 изложена методика определения функции изменения скорости движения быстроходной гусеничной машины на местности.

В качестве факторов, ограничивающих скоростные возможности машины, автор принимает тягово-динамический, плавность хода, управляемость в повороте и прямолинейном движении, а также эргономический фактор, связанный с возможностью осуществления операций наблюдения и управления движением.

В качестве критериев принимаются максимальные и средние квадратические значения вертикальных ускорений на месте водителя, устойчивость в повороте и возможность развивать соответствующее тяговое усилие (динамический фактор).

Расчетные исследования по формированию скорости при движении по трассе приведены на рисунках 5.3 и 5.4. Отличие расчетного и эксперимен-

тального процессов изменения скорости по среднему значению не превышает 9 % (рисунок 5.7).

В шестой главе выполнены расчетные исследования динамики гусеничной машины и проверка адекватности математической модели при прямолинейном движении и в повороте. Исследования выполнялись по разработанной модели движения применительно к машинам массой 40 и 14 т, а также снегоболотоходной машины ТМ-120. Адекватность модели оценивалась сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

Проанализирована динамика процессов трогания с места и разгона машины с переключением передач (рисунки 6.1 и 6.3). Показано, что на нагруженность шасси существенное влияние оказывают поперечные колебания корпуса и характеристика системы поддрессоривания (рисунки 6.6 и 6.7). Выполнены расчетные исследования и сопоставление с экспериментом динамических процессов при повороте машины на слабых и плотных грунтах. При этом отличие экспериментальных и расчетных данных не превышают 10...15 %.

Показано, что использование разработанной модели взаимодействия гусеницы с грунтом позволяет получить процессы изменения нагрузок, действующих на опорные катки при движении машины.

В разделе 6.3 на примере машины ТМ-120 проиллюстрирована возможность использования разработанной математической модели для выбора параметров системы поддрессоривания, а также оценки эффективности управляемой системы поддрессоривания.

В седьмой главе выполнено исследование эксплуатационной нагруженности в потенциально опасных зонах деталей ходовой системы при однопараметрическом и многопараметрическом случайном нагружении, рассмотрена методика расчета напряжений в опасной зоне трака, а также изложена последовательность решения задачи о прогнозировании ресурса трака гусеницы. Натурным экспериментам подтверждено, что наибольшие напряжения возникают при расположении трака в опорной ветви гусеничного обвода, а

также при прохождении траком направляющего и ведущего колес (рисунок 7.4). При этом жесткость грунта оказывает определяющее влияние на ресурс траков (рисунок 7.5).

Для определения случайных реакций грунта автором использован один из вариантов взаимодействия трака с грунтом в виде Винклеровского полупространства, в котором дискретные упругие элементы распределены по глубине по некоторому случайному закону (рисунок 7.7), что позволяет получить совокупность случайных реакций, соответствующих действию катковой нагрузки при движении машины по местности.

Восьмая глава посвящена методам прогнозирования усталостной долговечности деталей ходовой части, работающих в условиях случайного нагружения.

Для расчетной оценки накопленного усталостного повреждения при однопараметрическом нагружении автором использована методика, предлагающая схематизацию процесса изменения напряжений по методу полных циклов, расчет среднего значения ресурса и построение вероятности безотказной работы с учетом разброса усталостных характеристик материала.

Значение функции повреждаемости $F(\lg T)$ определяется как нормальное распределение логарифма долговечности (8.5), а значения функции надежности определяются выражением:

$$P(\lg T) = 1 - F(\lg T).$$

С помощью разработанной методики для серийной машины класса 40 т и машины с увеличенной массой выполнено прогнозирование ресурса торсионов передних подвесок, солнечной шестерни бортового редуктора, трака гусеницы.

Полученные функции вероятности безотказной работы элементов представлены на рисунках 8.4, 8.7 и 8.8.

В девятой главе диссертации изложена методика прогнозирования усталостной долговечности при случайном многопараметрическом нагружении.

Разработанный метод основан на использовании структурной модели материала и модели накопления повреждений для малоциклового усталости в предположении, что для многоциклового усталости чисто упругое деформирование не вносит повреждений, а усталость связана с микропластическими деформациями.

С помощью разработанной методики выполнена проверка эффективности мероприятий по усилению балансира подвески снегоболотоходной машины и получены функции надежности балансиров в исходном и усиленном вариантах (рисунок 9.6).

В десятой главе представлен комплекс расчетных и эксплуатационных работ по исследованию динамики и прогнозированию долговечности гусеничной ленты с податливыми уширителями для машины ТМ-120.

Экспериментальные исследования динамики работ гусеничной ленты выполнялись в ходовых и стендовых условиях.

В ходовых условиях при движении с заданными скоростями по дороге с твердым покрытием с помощью специально разработанного измерительного комплекса методом тензометрирования были получены осциллограммы процесса изменения напряжений в корневом сечении уширителя, что позволило в дальнейшем определить условие равнозначности ходовых и стендовых испытаний по накопленному повреждению (10.2):

$$v_{x1000} / N_x = v_c / N_c.$$

В разделе 10.2 описана разработанная математическая модель гусеничной ленты с податливыми уширителями и представлены результаты расчетных исследований.

В качестве примера приведены результаты расчетов при движении по ровному прямолинейному участку трассы с постоянной скоростью 8 м/с (рисунок 10.11).

Анализ тестовых результатов показывает, что они хорошо соответствуют результатам измерений, выполненных в условиях ходовых испытаний.

На основании выполненного комплекса работ автором в разделе 10.3 даны практические рекомендации по повышению долговечности траков с податливыми уширителями.

Общая оценка работы.

Содержание представленной диссертационной работы **в полной мере соответствует ее названию, заявленным целям и задачам.**

В диссертации представлен большой объем теоретических работ по **разработке математических моделей**, описывающих физические процессы нагружения элементов и деталей ходовой части транспортной гусеничной машины в условиях эксплуатационных стохастических воздействий со стороны дорожного микропрофиля.

Представленные в работе **математическая модель нагруженности ходовой части** гусеничной машины (глава 3), **стохастическая модель грунта** (глава 7), **модель накопления повреждений** (глава 9) и **модель гусеничной ленты с податливыми уширителями** (глава 10) выполнены с обоснованными корректными допущениями, разработаны на высоком математическом уровне на основе тщательно изученной и проанализированной автором технической литературы, отражающей современный уровень проникновения в исследуемые физические процессы.

Несомненным творческим достижением автора является **впервые разработанная** математическая модель, специально предназначенная для исследования эксплуатационной нагруженности ходовой части быстроходной гусеничной машины, учитывающая динамику корпуса и опорного катка, усилия натяжения в свободной и рабочей ветвях, а также нагрузки в опорной ветви обвода, работу двигателя и трансмиссии в переходных режимах, и включающая также подсистему, задающую управляющие воздействия на элементы, описывающие силовую установку, с помощью которой автор, при принятых факторах, ограничивающих скоростные возможности машины, оп-

ределил функцию изменения скорости движения машины по трассе, что позволило смоделировать методики испытаний.

На примерах экспериментальных и расчетных исследований криволинейного движения машины, переходных процессов при прямолинейном движении, оценки усталостной долговечности элементов и деталей ходовых систем в реальных условиях эксплуатации убедительно доказана **адекватность разработанных моделей.**

В работе также представлен большой **объем экспериментальных исследований, в том числе, и оригинальных,** таких как определение характеристик процесса разгона двигателя и постоянной времени регулятора, а также определение напряжений в корневом сечении уширителя трака в ходовых условиях методом тензометрирования, что потребовало разработки соответствующих методик и измерительных средств.

Используя разработанный математический аппарат и изложенные в работе методические подходы, автор получил расчетные функции вероятностей безотказной работы таких элементов и деталей как торсион, балансир, шестерня бортового редуктора, трак гусеницы с уширителями, которые, по преимуществу, и определяют надежность ходовой системы в целом.

Таким образом, разработанные теоретические основы и методы прогнозирования позволяют выполнить оценку надежности ходовых систем в реальных условиях эксплуатации.

Личный вклад автора не вызывает сомнений. **Лично автором** разработана математическая модель, **впервые** в полной мере отвечающая требованиям для возможности оценки и прогнозирования безотказности ходовых систем, на основе этой модели **лично автором** выполнены расчетные исследования и **впервые** получены функции вероятности безотказной работы основных элементов ходовой части, **по авторским методикам с участием непосредственно автора** проведены эксплуатационные исследования и получены результаты по решениям нагружения элементов ходовой части в реальных условиях эксплуатации.

Из положений, **выносимых на защиту и составляющих новизну работы**, следует выделить разработанную автором **специализированную применительно к задачам прочностной надежности математическую модель эксплуатации гусеничной машины**, отличающуюся тем, что она описывает динамику связанной нелинейной системы «внешняя среда – гусеничный движитель – подпрессоренный корпус – силовая установка – водитель» при многопараметрическом нестационарном случайном процессе, а также методику преобразования силового и кинематического воздействия на элементы конструкций в случайные процессы изменения компонентов тензора напряжений в опасных точках высоконагруженных деталей, позволяющую получить процессы изменения напряжений с учетом случайного характера нагружения.

Практическая значимость работы очевидна и не вызывает сомнений.

Это, в первую очередь, **возможность выполнения с помощью разработанных методов и программных средств расчетных оценок долговечности элементов и узлов ходовой части гусеничных машин**, прогнозирования безотказности их работы, целенаправленной разработки мероприятий по предотвращению разрушений, а также формирования режимов стендовых испытаний по доводке конструкций с учетом параметров стохастических внешних воздействий, характерных для условий эксплуатации.

Практическое внедрение и использование результатов работы будет в значительной степени способствовать повышению конкурентноспособности и качества разрабатываемых изделий.

Следует также отметить, что **включение в программы соответствующих учебных дисциплин на профильных кафедрах университетов разработанного автором метода прогнозирования усталостной долговечности** может существенно повысить профессиональную подготовку специалистов.

Работа написана грамотным языком, с использованием принятой при изложении рассматриваемых технических вопросов терминологии, с логиче-

скими посылками и переходами, **позволяющими представить диссертационную работу как одно цельное завершённое исследование.**

По существу выполненных исследований и некоторых положений работы можно сделать ряд замечаний.

1. В диссертационной работе **не приведены требуемые в соответствии с техническим заданием на ходовые системы гусеничных машин и их элементы показатели безотказности** и сопоставление с ними достигнутых на сегодняшний день и прогнозируемых показателей.

2. Несмотря на то, что разработанные математические модели взаимосвязаны между собой внутренней логикой предмета исследования, **каждая из них представляет собой математически независимую от остальных моделей систему**, с помощью которых по отдельным методикам вычисляются входящие в другие модели зависимости. По отдельным методикам с помощью конечноэлементного расчета определяются характеристики процесса взаимодействия трака с грунтом, выполняется оценка усталостной долговечности элементов системы.

Практическое использование разработанных математических моделей затрудняет также необходимость выполнения достаточно большого объема предварительных расчетов, например, по определению коэффициентов влияния для нахождения импульсов нагружения (страница 169).

Следует также отметить, что разработанные модели описывают физические процессы применительно к определенным видам и конструкциям систем шасси - трансмиссии, силовой установки, к конкретным конструкциям элементов и деталей ходовой части. Использование этих моделей для других конструктивных исполнений систем шасси будет требовать их существенной корректировки для каждого конкретного случая.

3. В разделе 6.3 автор иллюстрирует возможность применения разработанной модели для выбора параметров систем поддрессоривания и на основании полученных характеристик быстроходности (рисунок 6.18) обосновывает

возможность снижения нагруженности балансиров за счет уменьшения демпфирующих характеристик системы.

По этому поводу следует заметить:

- в техническом задании на машину требования по плавности хода задаются обеспечением проходной высоты стандартных неровностей, преодолеваемых во всем диапазоне рабочих скоростей при максимальных ускорениях, не превышающих $3g$, исходя из чего и выбираются характеристики системы поддрессоривания. При этом реализуемые в подвеске демпфирующие усилия на порядок меньше, чем нагрузки, на которые рассчитывается балансир при проектировании;

- представленные на рисунке 6.18 зависимости характеризуют плавность хода машины и не являются функциями быстроходности, в которую, по определению, наравне с плавностью хода входят такие свойства, как динамичность и управляемость.

4. В работе встречаются некоторые противоречия, объяснение которых требует дополнительных комментариев.

Например, выполненные с помощью разработанной модели расчеты динамики движения машины класса 40 т с исходными характеристиками поддрессоривания показывают, что **снижение демпфирования в подвеске приводит к более интенсивным колебаниям корпуса** (рисунок 6.7). Однако, при оценке эффективности управляемых амортизаторов для той же машины, **усилие которых снижается в соответствующий момент времени, сделан вывод о том, что такой алгоритм управления позволяет существенно (на 30...40 %) уменьшить колебания корпуса** (рисунок 6.22).

5. При расчете составляющих перемещений трака на активном участке (страница 81) не приведено каких-либо зависимостей для определения деформаций, вызванных перемещением опорных катков относительно корпуса. Отмечено лишь, что они «определяются конструкцией системы поддрессоривания» (страница 81).

6. Для определения эквивалентного одной тысяче километров пробега числа часов стендовых испытаний при фиксированной скорости вращения гусеницы согласно выражению 10.4 необходимо **располагать зависимостями**

ми амплитуд напряжений от скорости движения машины в ходовых условиях $\sigma_{ax}(V_x)$ и от частоты вращения для стендовых испытаний $\sigma_{ac}(n_c)$.

Приведенные в работе зависимости для σ_{ax} и σ_{ac} определены для конкретного конструктивного исполнения детали и носят частный характер.

Определение таких зависимостей для других деталей при большом разнообразии их конструктивного исполнения предполагает сложные и трудоемкие экспериментальные исследования, что для практических задач вряд ли будет оправдано полученным результатом.

7. В тексте диссертации имеется небольшое количество опечаток и неудачных определений, в частности, «типовая трасса» для трассы со случайным микропрофилем.

Однако сделанные замечания ни в никакой мере не могут повлиять на общую положительную оценку диссертационной работы.

Вывод.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Абызов Алексей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.05.03 - «Колесные и гусеничные машины» и 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Начальник лаборатории ходовой части
ОАО «ВНИИТрансмаш»
д.т.н., с.н.с.



С.В. Рождественский

Подпись официального оппонента,
начальника лаборатории

Рождественского С.В. заверяю

Генеральный директор
ОАО «ВНИИТрансмаш»



О.А. Усов